

# 粗さの触知覚におよぼす聴覚情報の影響に関する心理物理学的研究

著者	鈴木 結花
号	22
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	文博第376号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/59330">http://hdl.handle.net/10097/59330</a>

# すず き ゆい か 鈴 木 結 花

学 位 の 種 類	博 士 (文 学)
学 位 記 番 号	文博第 376 号
学位授与年月日	平成23年 3 月25日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	東北大学大学院文学研究科（博士課程後期 3 年の課程） 人間科学専攻
学 位 論 文 題 目	粗さの触知覚におよぼす聴覚情報の影響に関する心理物理学的研究
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 行 場 次 朗      教 授 大 淵 憲 一 教 授 阿 部 恒 之 准教授 辻 本 昌 弘 准教授 小 泉 政 利

## 論 文 内 容 の 要 旨

### 目 次

#### 第 1 章 序論

- 1.1 本研究におけるテクスチャの定義とテクスチャ知覚に関する先行研究
- 1.2 テクスチャ知覚における「粗さ」の位置づけ
- 1.3 テクスチャ知覚の多感覚性
- 1.4 テクスチャ知覚と聴覚情報に関する研究動向
- 1.5 触覚・聴覚間相互作用を示す知見と神経基盤
- 1.6 テクスチャ知覚における多感覚情報処理モデル
- 1.7 本論文の目的と構成

#### 第 2 章 表面の粗さの触知覚におよぼす非接触音の影響に関する検討

- 2.1 はじめに
- 2.2 粗さと長さの触知覚におよぼすホワイトノイズの影響（実験 1）
  - 2.2.1 目的
  - 2.2.2 方法
  - 2.2.3 結果
  - 2.2.4 考察

## 2.3 粗さと長さの触知覚におよぼす純音の影響（実験2）

### 2.3.1 目的

### 2.3.2 方法

### 2.3.3 結果

### 2.3.4 考察

## 2.4 実験1と実験2のまとめ

## 2.5 結論

# 第3章 表面の粗さ知覚における触覚・聴覚刺激強度の交互作用に関する検討

## 3.1 はじめに

## 3.2 触覚刺激の粒子径に依存する聴覚情報の影響（実験3）

### 3.2.1 目的

### 3.2.2 方法

### 3.2.3 結果

### 3.2.4 考察

## 3.3 触覚・聴覚モダリティにおける粗さ情報の整合性と聴覚情報の影響（実験4）

### 3.3.1 目的

### 3.3.2 方法

### 3.3.3 結果

### 3.3.4 考察

## 3.4 実験3と実験4のまとめ

## 3.5 結論

# 第4章 表面の粗さ知覚における触覚・聴覚情報の空間的要因に関する検討

## 4.1 はじめに

## 4.2 触覚・聴覚情報の空間配置の一致性と刺激部位および距離の影響（実験5）

### 4.2.1 目的

### 4.2.2 方法

### 4.2.3 結果

### 4.2.4 考察

## 4.3 結論

# 第5章 総合考察

## 5.1 非接触音が触覚による粗さ知覚に影響を及ぼし得るための要因

## 5.2 テクスチャ知覚における触覚・聴覚情報の処理過程モデルの提案

## 5.3 触覚・聴覚のテクスチャ情報処理研究の応用可能性

## 5.4 今後の展望

謝 辞

引用文献

日常環境に存在する物体は様々なテクスチャ(質感)をもち、私たちは日々それらを感じている。手触りや舌触りといったテクスチャの知覚は、対象についての認知や評価、あるいは対象との相互作用において重要な役割を持つ。従来のテクスチャの触知覚の研究においては、刺激の接触時に生じる音は遮蔽すべき対象であった。しかし、多くの場合、物体に触れるときには、同時に、接触によって生じる音が聞こえる。これまでの研究から、日常の知覚、認知がいかに多感覚的なものであるかが示されてきた。それゆえ、対象の表面をなぞることで知覚される肌理の細かさや材質感などのテクスチャ知覚は、触覚情報によってのみ成り立っているのではなく、接触に伴って生じた聴覚情報が寄与して形成されていると考えられる。

そこで、本論文では、テクスチャの粗さ知覚に聴覚情報がどのように影響を及ぼすのかについて検討した。さらに、表面質感処理における触聴覚情報処理過程の理解を深めることをめざし、表面の粗さ知覚における触覚と聴覚との相互作用における特性について、感覚情報の質的、量的側面および空間的要因の観点から心理物理学的手法を用いた検討を行った。

## 第1章 序論

第1章では、まず、テクスチャ知覚とは何か、また、テクスチャ研究のなかで、「粗さ」研究がどのような位置づけにあるかを概説した。触覚単独モダリティにおいても、ヒトのテクスチャ知覚がどのような知覚構造をもっているかは明らかになっていないが、「粗い－滑らか」、「硬い－柔らかい」の評価次元がテクスチャの知覚において重要であることは研究間で一致している。とりわけ、「粗さ」の研究が最も進んでおり、触覚による粗さ知覚のメカニズムについては、関連する触覚受容器のレベルまで説明されつつある。

次に、テクスチャの知覚が、本来、触覚のみならず聴覚や視覚が関わる多感覚処理であることに焦点をあて、関連する諸研究を概観した。テクスチャの違いを知覚するためには、視覚情報のみ、あるいは、表面を手指でなぞる音をたよりに研磨紙を弁別することも可能であるが、触覚の優れた点は、視覚や聴覚情報では弁別ができないような微細なテクスチャをも弁別可能な点にある。物体に関する形体的な知覚においては、空間解像度の優れた視覚情報が優位となるが、物体表面の肌理の細かいテクスチャを知覚する場合には、視覚よりも触覚情報が優位となって知覚されることが報告されている。しかし、表面テクスチャの知覚においては、視覚と触覚とは独立のシステムで処理がなされており、視触覚間の相互作用は比較的高次の認知的処理によるものであると考えられている。

そこで、本研究ではテクスチャ知覚における触覚と聴覚の相互作用について注目した。従来のテクスチャ研究において聴覚情報がどのように用いられてきたかを概説し、近年報告された、テクスチャ知覚における触覚・聴覚間の相互作用を示す現象を紹介した。

肌理の粗い表面を知覚するときには、手を表面上に載せるだけでもその違いを認識することが可能であるが、微細なテクスチャを知覚するときには、触官(触れる部位)と表面の間の相対的運動に伴う振動感覚が不可欠となる。この振動感覚と聴覚は力学的メカニズムにおいて類似しており、さらに直接的な関連性として、接触に伴って音が生じる。触れることにより知覚される表面の情報にはこの聴覚情報が含まれているが、表面テクスチャの触知覚に関する従来の研究では、ヘッドフォンからホワイトノイズを定常的に提示したり、耳栓をつけることで、あえて聴覚情報が得られないようにすることが多かった。

Lederman (1979) は、溝を彫った金属製のプレートを実験者が指でなぞる音を聞くことにより粗さを判断することが可能であることを確かめたが、実験参加者が自ら刺激に触れ、同時に触覚情報も得ることができる場合には、触覚情報が完全に優位になることを報告した。しかし、指の代わりに硬いプロー

ブを用いた場合や、指で研磨紙に触れた音をヘッドフォンからフィードバックした場合には、聴覚情報が表面テクスチャの知覚に影響を及ぼすという結果が報告されてきた。また、食品を咀嚼する際に感じられる食感には舌や唇から得られる触覚情報だけでなく、歯で噛んだ際に生じる聴覚情報も大きく関わることを示す報告もある。最近では、表面をなぞることで触覚と聴覚の両者からテクスチャに関する情報が得られることから、その多感覚的な体験ゆえに‘textural timbre (テクスチャの音色)’ともいわれる。

さらに、脳神経科学的知見および行動研究をとりあげて、触覚と聴覚が深く関連することを概説した。触覚と聴覚の相互作用については、初期に、von Békésy (1955) が両モダリティの共通点に注目した。異種感覚間相互作用研究の中でも、視覚・聴覚間および視覚・触覚間相互作用に関する研究に遅れて、最近、行動研究と脳機能研究の双方から聴触覚間の相互作用について報告がなされるようになってきた。触覚と聴覚は、一次聴覚野と二次体性感覚野が近接している点、触覚野から聴覚野への解剖学的な連絡がある点、触覚情報と聴覚情報の入力に対して共通の部位が賦活する点において、感覚統合に適した皮質構造を有している。それゆえ、テクスチャの知覚においても触覚と聴覚の両者が深く関わっており、認知的処理段階以前の、比較的低次のメカニズムにおいて感覚統合処理がなされていると考えることの妥当性は極めて高いと考えられる。

触覚と聴覚が密接な関係をもつことを示す知見が蓄積されてきたが、表面テクスチャにおける触覚・聴覚情報処理メカニズムについては解明されていない。そこで、まず、Lederman and Klatzky (2004) が提唱した、多感覚情報によるテクスチャの知覚処理モデルについて検討した。このモデルは、情報処理に対するモダリティの適切さと情報へのアクセス可能性によって各感覚情報が重みづけられ、統合処理を経てテクスチャ知覚が決定するというものである。情報処理に対するモダリティの適切さの点では、表面の粗さ知覚の場合には、触覚がより適切なモダリティとなる。しかし、このモデルには、感覚情報の時空間的および質的、量的な関係性などの具体的な要因についての記述が欠如していることを指摘した。

対象との接触に起因しない音（非接触音）であってもテクスチャ知覚に影響し得るのか、強度の大きい感覚情報に対して重みづけがいつも大きくなるのか、感覚刺激間に空間的な乖離があっても相互作用が生じるのか、などに代表されるように、両モダリティからの情報が得られる際のテクスチャの知覚処理メカニズムについてはまだ解明されていない点が多い。しかし、これらは、多感覚情報からテクスチャを知覚するときの、各感覚情報への重みづけに関わる要因となると考えられる。そこで、本論文では、テクスチャ知覚における、触覚情報と聴覚情報の質的・量的な関係性や、情報の空間配置の影響について心理物理学的に検討することを目的とした。

本論文では、物体表面を指で触れる際に生じる接触音だけでなく、非接触音であってもテクスチャの粗さ知覚に影響を及ぼし得ることを確かめた上で（第2章）、触覚と聴覚の両モダリティにおける、強度あるいは粗さに関わる情報（第3章）や感覚情報の空間配置（第4章）が感覚間相互作用においてどのように影響を持ち得るのかについて実験的検討を行い、表面の粗さ知覚に聴覚情報が影響を及ぼすメカニズムについて考察した（第5章）。

## 第2章 表面の粗さの触知覚におよぼす非接触音の影響に関する検討

手掌をこすり合わせた際に生じる摩擦音をヘッドフォンからフィードバックすると、高域周波数帯（2–20kHz）の音圧操作によって手掌の「滑らか／乾き」感が変化するという現象（「羊皮紙様皮膚錯覚：‘Parchment-skin illusion’」）が Jousmäki and Hari (1998) によって報告された。また、手掌だけでなく、研磨紙においても、高域周波数帯（2–20kHz）を増幅するとより粗く、減衰するとより滑ら

かに感じるという結果が示された。

しかし、従来のほとんどの研究では、触覚刺激と共変する接触音が聴覚刺激として用いられてきた。そこで、第2章では、実際の接触により生じた音でなくとも、接触到同期して音が提示されるときに表面テクスチャの知覚が変容し得るか否かについて検討した。初期に、Schiller (1932) が表面テクスチャの触覚知に音が影響を及ぼすことに言及したが、これまで、接触到起因しない聴覚情報が表面テクスチャの知覚に及ぼす影響について定量的に検討した研究はほとんどなかった。

そこで、実験1では、ホワイトノイズの音圧変化（ノイズ条件）あるいは非常に短いビープ音（コントロール条件）に合わせて刺激に接触したときの触覚的粗さ判断および長さ判断を、マグニチュード推定法を用いて比較した。長さ判断課題を設けた理由は、触覚刺激の粗さと長さの弁別時では異なる脳部位が賦活すると報告されていることから、非接触音のクロスモーダルな影響が触覚処理全般に生じるものであるのか、あるいは粗さ知覚に選択的に生じるのかを区別するためであった。

実験の結果、触覚的粗さ判断のみにおいてベキ指数に差がみられ、ノイズ条件の方がコントロール条件よりも粗さのベキ指数が小さかった。この結果から、接触音ではない、幅広い周波数成分を含む複雑な音も粗さ判断に選択的に影響を与えることが明らかになった。

また、ホワイトノイズによる粗さのベキ指数の変化が聴覚情報の有無による影響なのか、幅広い周波数分布をもつ聴覚情報の影響なのかを明らかにするため、実験2では、ホワイトノイズのかわりに1000Hzの純音を用いて同じパラダイムで実験を行ったところ、純音では粗さに選択的な影響は見られなかった。

実験1の結果から、表面への接触音に起因する音でなくとも、複合音（ホワイトノイズ）に手の運動を同期させることで、触覚による粗さ知覚が変調し得ることが明らかになった。このクロスモーダルな影響には、ホワイトノイズが研磨紙の接触音と同様に広い周波数成分を含むという、物理的な特徴の類似性が重要な役割を果たしていると考えられた。また、得られた知見は、下に記す行動、脳機能および生理学研究の知見と一致するものであった。時間順序判断課題を用いた研究においては、純音よりもホワイトノイズが触覚との相互作用を生じさせやすいことが報告されている。また、ヒトを対象としたfMRI研究においても、研磨紙と広帯域雑音を同時提示した場合に、触覚と聴覚の統合に関与する脳部位が示されている。さらに、サルの前運動野において、頭部近傍（頭部から約30cmの範囲）の複数からの感覚入力に応答するマルチモーダルなニューロンが見出されているが、そのニューロンは、聴覚刺激の距離と音の複雑さに依存した反応を見せ、ホワイトノイズや鍵の触れ合う音などの複合音のみ反応すると報告されている。

本研究では、実験1および実験2を行い、表面の粗さ知覚において、広い周波数帯を含む複雑な音が触覚との相互作用を生じさせやすいことを明らかにした。また、長さ判断においては聴覚情報の影響が観察されなかったことから、複合音のクロスモーダルな影響は触覚処理一般に及ぶものではなく、粗さの触覚知覚に関わる処理基盤と複合音の聴取に関わる処理基盤とが密接に関わることを示唆するものであった。

### 第3章 表面の粗さ知覚における触覚・聴覚刺激強度の交互作用に関する検討

第2章（実験1, 2）では、ホワイトノイズの音圧変化に合わせて指を動かし研磨紙に触れると、触覚的な粗さのベキ指数が縮小するという知見を得た。しかし、この結果は、ホワイトノイズの提示による、粗さ弁別感度の全般的な低下を反映している可能性、あるいは、特定範囲の触覚刺激における感覚間相互作用の生じやすさに起因している可能性が考えられた。従来のテクスチャ研究では、触覚と聴覚

の相互作用の生起可能性に、触覚情報の物理特性（例えば構成粒子径）が影響を及ぼすかといった問題が検討されていない。

そこで、粗い刺激にも滑らかな刺激にも同程度に聴覚情報が影響を及ぼすのか否かを検討する必要があるため、実験3では、粗さの触知覚に及ぼす非接触音の影響が、触覚刺激の物理的な粒子の大きさに依存するののか否かについて、粗さ知覚の閾値に近い刺激（微細テクスチャ）および構成粒子径が比較的大きい刺激（粗大テクスチャ）を用いて検討した。

実験参加者はクリック音に合わせて刺激を触り、粗大テクスチャのペアと微細テクスチャのペアのそれぞれにおいて粗さの弁別課題を行った。このとき、接触と同時に提示される聴覚刺激として、ホワイトノイズが提示される条件、純音が提示される条件、クリック音のみが提示される（コントロール）条件が設けられた。

実験3の結果、粗大テクスチャの弁別において、ホワイトノイズは粗さ判断をより粗い方向へ変容させたが、微細テクスチャの弁別成績には聴覚刺激の影響がみられなかった。

触覚刺激の粒子径の差異により聴覚刺激の影響が異なって観察された原因として、主に二つの可能性が考えられた。第一の可能性は、特定の大きさの粒子をもつテクスチャの粗さ知覚が聴覚情報の影響を受けやすい可能性である。実際、微細テクスチャの弁別では、接触により生じる音が耳まで届かないか、あるいはごく微かである。したがって、もともと聴覚情報と統合させる有益性がないため、クロスモーダルな相互作用が生じない可能性が考えられた。

第二の可能性は、聴覚情報が粗さの触知覚に影響をおよぼすためには、テクスチャと音との間に何らかのクロスモーダルな対応関係（整合性）が必要であり、触覚刺激の特定の粒子の大きさや材質と、聴覚刺激の特定の大きさ、高さ、複合性などの性質が、相互作用を生じさせやすい対応関係をもつ可能性である。例えば、Stevens and Harris (1962) が粒度の異なる研磨紙とバンドノイズの音圧によるクロスモーダルマッチングを行ってベキ指数を求めたことにもみられるように、触覚刺激の粗さと主観的に等しい音圧のノイズが存在し、この関係性にあるときに相互作用が生じやすい可能性が考えられた。

そこで、実験4では、実験3の結果が、第二の可能性、つまり、モダリティ間における粗さ情報（強度）の整合性の影響を反映している可能性について検討するため、まず、予備実験として、粗大テクスチャと、微細テクスチャのそれぞれを触った際に触覚で感じられる粗さと、ホワイトノイズに感じられる聴覚的粗さが等しくなるようにクロスモーダルマッチングを行った。この測定結果に基づき、粗大テクスチャの粗さと主観的に等しいとされたノイズ（強ノイズ、71dB）は粗大テクスチャの粗さと一致し、微細テクスチャの粗さに等しいとされたノイズ（弱ノイズ、51dB）は微細テクスチャの粗さに一致する情報をもつものとした。本実験では、粗大テクスチャと微細テクスチャのそれぞれにおいて粗さの弁別課題を行い、手の運動に同期して聴覚刺激が提示されるときに、聴覚・触覚間の粗さ情報の一致・不一致が聴覚情報の効果に及ぼす影響を検討した。

実験4の結果、粗大テクスチャは、粗さの情報が一致する強ノイズが提示されるときにより粗く判断され、微細テクスチャは粗さ情報が一致する弱ノイズが提示されるときにより滑らかに判断されることが明らかになった。

実験3および実験4の結果から、聴覚情報が粒子の小さい微細テクスチャに影響を及ぼさないのではなく、触覚と聴覚における粗さの情報あるいは強度に整合性があるときに、聴覚情報が影響を及ぼしやすくなることが示唆された。一般的に、強度の大きい刺激の方が他の感覚モダリティの知覚に影響を及ぼす結果を示す研究が多い。しかし、第3章で得られた興味深い知見は、大きい音圧のノイズが必ずしも表面の粗さ知覚に影響を及ぼしやすいたとは限らず、触覚刺激の（主観的に感じられる粗さの）強度に

一致した強度を持つ聴覚刺激による影響が顕著になることである。

#### 第4章 表面の粗さ知覚における触覚・聴覚情報の空間的要因に関する検討

第4章では、聴覚情報が提示される際の表面の粗さの知覚において、触覚情報と聴覚情報の空間配置がどのような効果をもつのかについて検討した。

視覚と聴覚、あるいは視覚と触覚といった感覚間相互作用と異なり、触覚と聴覚における相互作用は空間的な制約を受けにくく、触覚情報と聴覚情報との間に空間的な乖離が存在する場合にも相互作用が生じることが知られている。ところが、最近、頭部近傍の後方では特異的に感覚相互作用が空間依存性をもつことが報告された。つまり、触覚刺激を頭部（両耳）に提示し、聴覚刺激を頭部近傍の後方から提示したときには、触覚刺激と聴覚刺激が空間的に（左右が）一致している場合に、感覚間相互作用がより顕著となることが示されたのである。

しかし、従来の研究では、物体表面の触感の知覚において、聴覚情報の空間配置や触覚刺激を提示する部位による違いがあるのかといった空間的要因については検討されていない。そこで、第4章（実験5）では、顔（頬）と手（指）に受動的に提示される触覚刺激の粗さ弁別課題を行い、触覚刺激の接触と同期して提示される聴覚情報の空間配置（左右）の一致性および頭部からの距離（近傍・遠方）が聴覚刺激によるクロスモーダルな効果に影響を及ぼすか否かを検討した。

実験5の結果、頬に触覚刺激を提示した際には、聴覚情報の違いにより粗さ弁別感度に差がみられた一方、手指においては反応バイアスに差が見られた。頬条件においては、頭部近傍から聴覚刺激が提示されるとき、触覚刺激と同側に提示される条件の弁別感度は、触覚刺激と反対側に提示される、あるいは音が提示されない条件の感度よりも高かった。他方、手指条件では、音が近傍から提示されるとき、空間的一致性にかかわらず、聴覚刺激が提示されたときには、より粗い方向に判断がシフトし、聴覚刺激が提示されない場合には、より滑らかな方向にバイアスのかかった判断となることが示された。

実験5で得られた結果から、頬、手指における粗さの触知覚は、いずれも遠方よりも頭部近傍に提示されるノイズの影響を受けやすいことがわかった。これらの結果は、先行研究の報告と一致し、触覚的粗さ判断においても、聴覚情報が頭部近傍に提示されるときに、クロスモーダルな影響が顕著になることを示唆するものであった。ただし、聴覚情報が表面の粗さ知覚に及ぼす影響は、頬では知覚段階に、手では決定段階においてみられた。

触覚刺激が頬に提示されるとき粗さ弁別感度において、触覚刺激と聴覚刺激が空間的に一致しているか否かで差が見られたことは、触覚刺激を頭部に提示したときに選択的な空間的一致性効果を示す知見と関連する。触聴覚情報が空間的に一致した際に顕著となる干渉効果は、頭部近傍に置いた手においては観察されず、頭部（耳）に触覚刺激を提示したときに選択的に生じることが先行研究で示されている。本研究においても、頭部近傍に置いた手に触覚刺激を提示した場合には聴覚情報の空間一貫性の効果はみられなかった。

また、実験5で用いたホワイトノイズは触覚刺激の粗さ弁別課題の遂行には有効な情報を提供するものではなかったが、頬の触覚刺激と空間的に一致した側の頭部近傍に提示されると、音が提示されないとき（および不一致方向からの提示時）と比較して、触覚の粗さの弁別感度が向上した。先行研究では、直接関連のない他の感覚モダリティの情報により、弁別あるいは検出の感度が向上するか否かは、双方のモダリティの刺激強度や、周波数などの刺激特性、空間配置に依存することが示されている。本研究で用いた聴覚刺激は広い周波数成分を含み、触覚刺激に接触した際の周波数成分もカバーしていたため、課題に非関連な聴覚刺激であっても粗さの触知覚の弁別感度を向上させる関係にあった可能性が示



唆された。

本章では、触覚刺激がどの身体部位に提示されるか、また、聴覚刺激が頭部近傍に発生源をもつか、あるいは感覚情報が空間的に一致しているかといった空間的要因が、表面の粗さ知覚における感覚間相互作用に極めて重要な要因となり得ることを明らかにした。

## 第5章 総合考察

本論文では、表面の粗さ知覚において触覚情報に加えて聴覚からの情報が得られるときに行われる感覚統合処理について、刺激特性と空間配置の観点から心理物理学的に検討した。まず、本研究の知見から明らかになった、粗さの触知覚に非接触音が影響を及ぼし得る要因を概説した。

第2章では、対象への接触に起因しない聴覚情報であっても、複合音（ホワイトノイズ）の音圧変化に合わせて触覚刺激に触れると、表面の粗さ知覚が変容することを確かめた。

第3章では、触覚情報と聴覚情報との間で、感じられる刺激の粗さに整合性があるときに、表面の粗さの知覚に聴覚情報による影響が顕著になることを明らかにした。また、聴覚情報による影響は必ずしも同一方向でない（加算的でない）ことを示した。粒子のより大きな触覚刺激に対しては、主観的に粗さが一致する、より大きな音圧のホワイトノイズが提示された場合には粗い方向に判断が変化し、逆に、小さな音圧のホワイトノイズが提示されたときには滑らかな方向に変化した。それゆえ、多感覚情報処理メカニズムを解明するためには触覚、聴覚のいずれかの刺激特性を操作するだけでは不十分であり、両者のもつ粗さ情報（強度）の一致性についても考慮する必要性を明らかにした。

第4章では、表面の粗さ知覚において、音の影響が、触覚、聴覚情報の空間的一致性（左右）や距離に依存するかどうか、また、刺激部位（頬や手）によって異なるのか否かを調べた。その結果、肌理の細かいテクスチャの粗さ判断は、刺激の空間配置とは関連のないようにも思われるが、特に頬において触覚と聴覚の情報源の配置の影響を敏感に受ける特性をもっており、また、触覚刺激の提示部位が指と頬のいずれの場合でも、遠方から聞こえる音よりも近傍の音の影響を受けやすいことが明らかになった。

上で述べたように、本研究では、表面のテクスチャ知覚に聴覚情報が影響を及ぼすためには、感覚強度や空間的要因が大きく関わることを明らかにした。さらに、先行研究で指摘されている時間的な要因も取り込み、テクスチャ知覚における感覚統合に関わるこれらの要因の位置づけについて考察した。感覚統合モデルとして、Lederman and Klatzky (2004) は重みづけに着目した概念モデルを提唱している。このモデルによると、情報処理に対するモダリティの適切さと、情報へのアクセス可能性が独立した要因となって各感覚モダリティへの重みづけが決まり、統合処理がなされてテクスチャの知覚が成立する。このモデルは、複数の感覚モダリティの情報が実際に同一のイベントに起因することを前提とするが、近年では身近なものとなったバーチャルリアリティー環境など、感覚情報の発生源を同一のものにできない場合においても適用可能な情報処理モデルを構築する必要がある。

そこで、同時に複数モダリティからの入力がある際の、非接触音にも適用できるモデルを提案した。本研究において明らかになった知見を踏まえると、感覚情報の強度の整合性や感覚情報の空間配置・部位・距離に依存した相互作用を説明するためには、重みづけされた感覚入力が統合される段階よりも初期の処理段階、つまり、触覚・聴覚の感覚モダリティの処理段階において連絡があると考えた。触覚情報と聴覚情報が得られるときの表面の粗さ情報処理過程において、まず、各感覚モダリティの処理レベルに連絡があり、「感覚情報あるいは強度の一致性」、「時間的一致性」、「感覚情報の距離」、「感覚情報の空間的一致性（顔に特異的に関わる）」の要因が満たされている場合に変調され得ると想定した。さらに、上記の要因が満たされているか否かの基準をもって、情報処理（課題）に対するモダリティの適

切さおよび感覚情報へのアクセス可能性を含意する「感覚入力信頼性」が感覚入力への重みづけを決定し、テクスチャの知覚がなされ则认为した。

また、ヒトを対象とした脳機能イメージング研究によって報告されている、触覚におけるテクスチャ処理に関連する脳部位と、触覚と聴覚との相互作用に関連する脳部位が解剖学的に近接していることから、触覚・聴覚の統合処理に関わる聴覚野の活動が、それと近接する、テクスチャ処理に関わる脳部位に投射している可能性が高いと予測し、脳機能研究による実証の必要性を論じた。

さらに、テクスチャ知覚における触覚・聴覚間相互作用のメカニズム解明をめざす本研究が貢献し得る応用可能性について考察した。本研究の応用可能性として、第一に、工学的研究が考えられる。現在、触覚情報の提示技術は視覚や聴覚に遅れをとっているが、ヒューマンインターフェースやバーチャルリアリティの技術開発において、適切な強度および時間・空間配置で聴覚情報を提示することで、開発途上の触覚提示技術による表面テクスチャの提示を補助する、あるいは、より多様なテクスチャの提示も可能にするを考える。また、開発途上の触感センサと、人間が多感覚情報を用いて感じる触感との間にある乖離を埋める手掛かりになる可能性について議論した。

第二の応用可能性として、視覚障害者への新しい情報提示デバイスの開発への貢献について考察した。視覚障害者がパソコンのディスプレイに表示された文字を読むための技術として、画面読み取りソフト（スクリーンリーダー）などがある。また、図形情報は、点や線が凸状に浮き上がった触図を手で触ることにより伝達することが試みられているが、最近では、視覚情報を二値的な触覚情報に置き換えるディスプレイも開発されている。また、地図としては触地図が用いられているが、指でなぞると、実際のその地点で聞こえる環境音や建造物を示す音声を聞くことができる地図も開発されている。このような触覚ディスプレイにおいて、より効果的な空間配置に、適切な特性（強度など）を持った聴覚情報を加えることで、より多様で直観的な情報が伝達可能になると考えられる。

第三に、食品などの製品開発への貢献の可能性について議論した。第1章で述べたように、咀嚼音を操作することで食感の評価が変化する。企業は常に新商品の開発を求められるが、味だけでなく、手触りや舌触りにほどよく対応した、効果的な咀嚼音を生起させる素材など、多感覚的な飲食の「音」に注目した食品開発の場にも有益な資料を提供できると考える。

最後に、今後の研究を展望した。粗さ以外にも、硬さなどの知覚次元における多感覚統合メカニズムの解明をめざすとともに、粗さ知覚と密接に関わる、触り心地のよさといった情緒的側面においても触覚・聴覚間相互作用が生じている可能性について検討する必要があることを指摘した。また、「すべすべ」、「ざらざら」といったオノマトペの生成能力に表れる、触印象と聴覚や音声表現との共感覚的關係の解明、聴覚ミラーニューロンシステムとテクスチャ知覚の関連性の解明といった研究の発展性についても考察した。

本論文では、物体表面に触れた際に聴覚情報が得られるときの粗さ知覚処理過程について、刺激特性と空間配置の観点から検討した。今後、粗さ以外のテクスチャの属性についても検討する必要があるが、表面の粗さ知覚においては聴覚情報が深く関わることを確かめた。本研究では、第一に、触りに関連のない複合音も影響を及ぼすこと、第二に、相互作用の生起可能性に関わる感覚情報の強度は一義的なものではなく、感覚間に交互作用があること、第三に、時間的な同期性だけではなく、触覚刺激の提示部位や聴覚刺激の空間配置も相互作用の生起可能性に関わることを明らかにした。

質感の知覚は適応的に行動する上で重要な機能であるが、本来、多感覚的であるにもかかわらず、その感覚統合メカニズムは明らかになっていない。本研究は、非接触音を用いることで、触覚と聴覚の感覚情報を独立に操作することを可能にした。それにより、触覚と聴覚の情報の統合に関わる要因をより

多角的に捉えるというアプローチは、テクスチャ知覚における感覚統合メカニズムを解明する重要な切り口になると考える。さらに、本研究において見出した感覚間相互作用の要因の中でも、感覚情報（強度）の一致性の要因については、これまでの多感覚研究において、ほとんど検討されてこなかったが、多感覚統合一般に共通し得るものとして、検討すべき重要な要因に関する知見を提供すると考える。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、テクスチャの粗さ知覚における触覚と聴覚の感覚統合において、触覚・聴覚刺激の質的、量的側面や、空間配置、および提示身体部位が重要な要因となることを、精緻な心理物理実験により明らかにしたものである。

実験1および実験2では、対象への接触に起因しない聴覚情報であっても、白色雑音の音圧変化に手指の動作を同期させながら触覚刺激に触れることで、表面の粗さ知覚が変容することを確認した。単一周波数から構成される純音では、この効果は得られなかった。さらに、この聴覚情報の影響は、触覚情報処理一般に見られるものではなく、粗さ処理において選択的に生じることを明らかにした。

実験3および実験4では、聴覚情報の強度が大きいときに触覚への影響力が増大するのではなく、触覚情報と聴覚情報との間で、感じられる刺激の粗さに整合性があるときに、粗さの触知覚に対する聴覚情報の影響が顕著になることを明らかにした。また、聴覚情報による影響は必ずしも加算的でないことも示された。それゆえ、多感覚情報処理メカニズムを解明するためには触覚、聴覚のいずれかの刺激特性を操作するだけでは不十分であり、両者のもつ粗さ情報の主観的一致性についても考慮する必要があることが明らかにされた。

実験5では、表面の粗さ知覚において、音の影響が、左右に提示される触覚と聴覚刺激の空間的一致性や距離に依存するかどうか、また、刺激身体部位（頬や手）によって異なるのか否かを調べた。その結果、粗さの触知覚は、特に頬において、両刺激間の距離の影響を敏感に受ける特性をもっており、また、指と頬のいずれに刺激が与えられた場合でも、遠方から聞こえる音よりも近傍の音の影響を受けやすいことが明らかとなった。さらに、聴覚情報の影響が粗さの触覚処理のどの段階において生じているのかについても検討を行った。その結果、頬で粗さを弁別するときには、触知覚段階において聴覚情報の影響が見られ、両刺激の空間位置が一致している場合には感度が高くなることがわかった。一方、手指で粗さの弁別をするときには、反応段階でバイアスが生じ、両刺激の空間位置には依存せず、聴覚情報が提示されたときにはより粗い方向へ判断がシフトすることなど、新しい知見が得られた。

以上の成果は、触覚と聴覚の情報統合に関わる要因をより多角的に捉えたものであり、テクスチャ知覚における異種感覚統合とその神経基盤に関して、重要な示唆を与えるものである。さらに、対象の質感を知覚する際に、脳内で行われている触聴覚統合に関する知見は、人間工学あるいは製品開発の分野に応用可能であり、感性福祉など現実場面への貢献も期待される。したがって、本研究はこれらの分野の研究の発展に大きく貢献すると考えられる。よって、本論文の提出者は博士（文学）の学位を授与されるに十分な資格を有するものと認められる。